

光通信用半導体レーザの電流閉じ込め構造に関する研究

著者	西 洋
号	2305
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/7578

氏 名	にし ひろし 西 洋
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 11 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士過程）電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	光通信用半導体レーザの電流閉じ込め構造に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 伊藤 弘昌
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 内田 龍男

論 文 内 容 要 旨

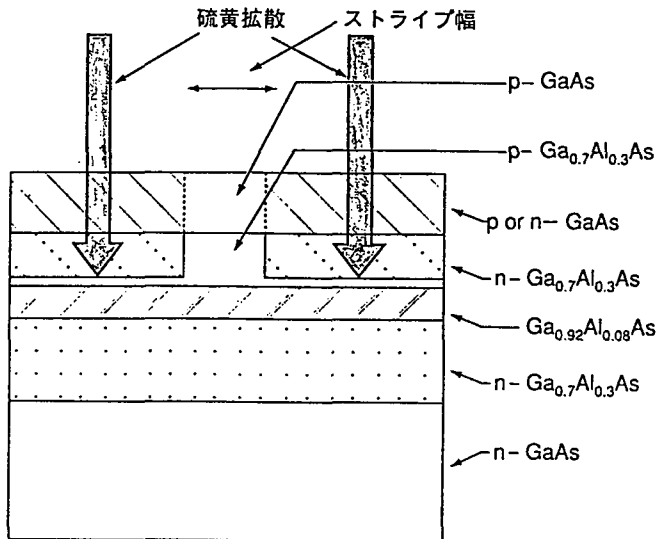
本論文は、光通信用半導体レーザとして石英ファイバの低損失領域である発振波長 $0.85\ \mu\text{m}$ の GaAlAs/GaAs ダブルヘテロ(DH)構造レーザおよび $1.3\ \mu\text{m}$ の InGaAsP/InP DH レーザの発振特性、つまり、しきい電流特性、変調特性、垂直・水平横モード特性、軸モード特性、等の改善を目的にしている。すなわち、高速・大容量の光通信用半導体レーザに要求される狭ストライプ幅化、および効率の良い電流閉じ込め構造を実現するための結晶成長・プロセス技術の確立を目指したものである。具体的には、 $0.85\ \mu\text{m}$ 帯レーザでは「硫黄の選択拡散」を GaAs/GaAlAs ヘテロ接合層へ初めて適用した電流閉じ込め構造の利得導波型レーザを、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯レーザでは「反導波層」と名付けた n 型 InGaAsP 層を導入した電流閉じ込めと横モード制御を同時に行なう新しい構造の屈折率導波型レーザを、それぞれ考案して実現した。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全文は 6 章より成り、その内容を以下に記す。

第 1 章は序論であり、研究の背景、目的、構成について述べた。

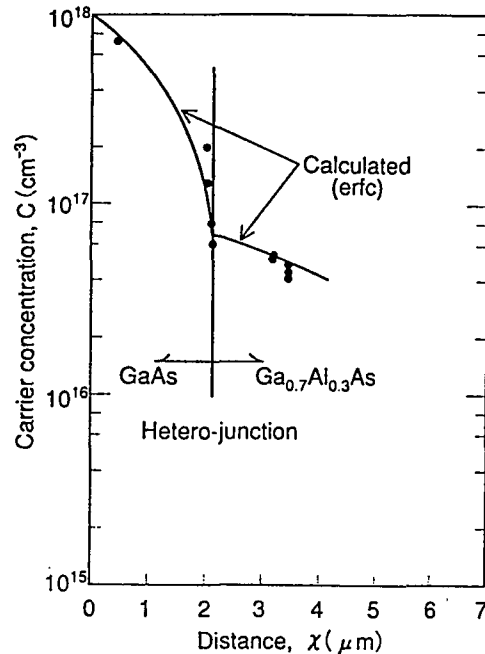
第 2 章では、半導体レーザの基本的な問題点である、レーザ発振に寄与しない電流広がり成分を減少することが非常に重要であることを指摘し、その具体的な手段（構造、製作方法）について検討した。次に、DH レーザに共通なレート方程式とマックスウェル方程式を用いて、 $0.85\ \mu\text{m}$ および $1.3\ \mu\text{m}$ 帯レーザについて発振特性の解析・検討を行なった。特に、高速変調について主要なパラメータに着目して検討し、活性層厚、ストライプ幅、屈折率差、等の構造パラメータによる設計指針を導出した。

第 3 章では、 $0.85\ \mu\text{m}$ 帯 GaAlAs/GaAs レーザの電流閉じ込め構造（図-1）を実現するための硫黄拡散の実験を行い、高純度の拡散原料（GaS）を用いることおよびその拡散条件を的確に制御することにより再現性のある硫黄拡散技術を確立した。実験結果と理論的解

析結果との比較から非常に良好な一致が得られ（図－２）、硫黄拡散はフィックの第２法則に従ったスムーズな拡散が行なわれていることが明らかになった。GaAlAs およびそのヘテロ接合層への硫黄拡散を初めて行い、拡散係数、表面濃度、等の物質定数を系統的に測定より求めた。硫黄拡散は、亜鉛拡散のような高濃度拡散ではなく、 10^{16}cm^{-3} オーダの低濃度拡散が実現でき、拡散による結晶成長層へのダメージも非常に少ないことを明らかにした。

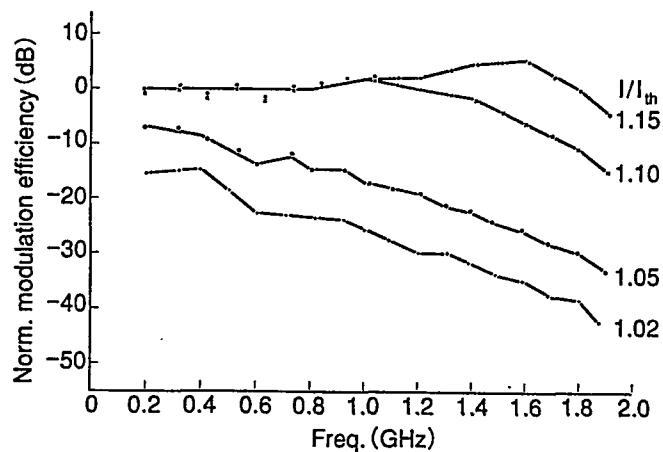


図－１ 硫黄拡散によるレーザの構造



図－２ ヘテロ接合への硫黄拡散

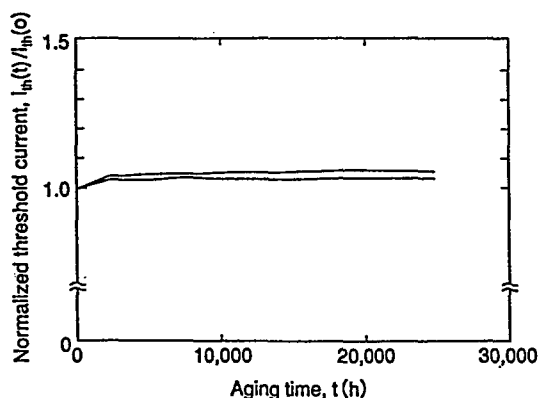
この結果をもとにした硫黄拡散による利得導波型レーザを製作し、その発振特性について実験・検討を行なった。狭いストライプ幅（ $7\mu\text{m}$ ）のレーザにおいて、低しきい電流密度（ $3.3\text{ kA}/\text{cm}^2$ ）、横モード単一、広帯域変調（ $\sim 2\text{ GHz}$ ：図－３）、等の発振特性の改善を確認した。しかし、横モード単一発振は得られたが、注入電流の増加に対してピーク値がわずかに変動するという利得導波型レーザ固有の問題点を明らかにした。



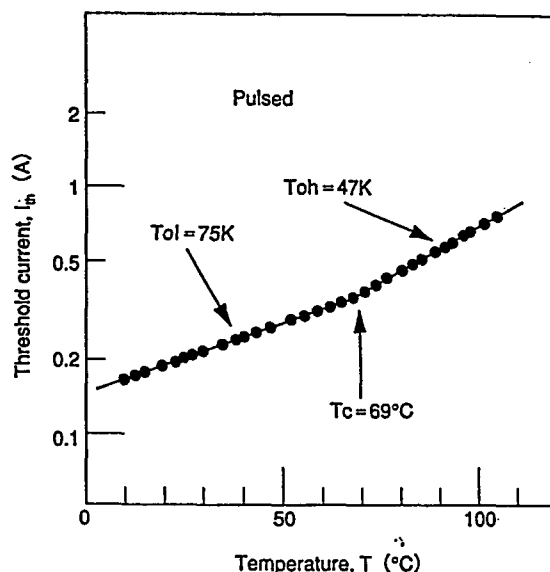
図－３ 周波数応答特性（ $W = 5\mu\text{m}$ ）

第４章では、 $1.3\mu\text{m}$ 帯 InGaAsP/InP レーザを製作し、その特性の特徴と問題点について $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザと比較検討した。しきい電流、横モード、軸モード、等の発振特性には大きな差はなかったが、端面劣化に対して強いこと（図－４）およびしきい電流の温度

特性が劣ること（図－５）を明らかにした。

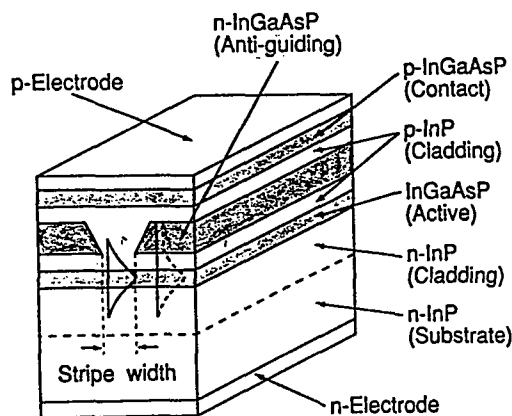


図－４ エージング特性（3 mW、空气中）

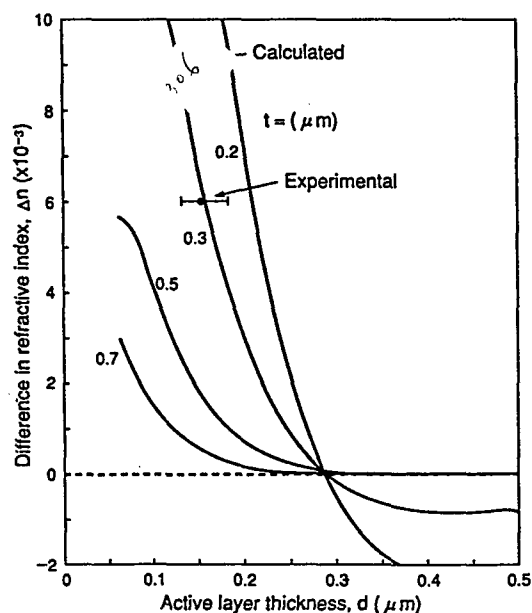


図－５ しきい電流の温度特性

第5章では、 $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザにおいて p 型 InP クラッド層内に反導波層と名付けた n 型 InGaAsP 層埋め込むことにより、電流閉じ込め構造（図－6）を実現した。この層は横モードも同時に制御する屈折率導波型レーザである。横モードを制御するために必要な屈折率差 (10^{-3} 以上) が得られていることを理論的・実験的に確認した（図－7）。狭いストライプ幅 ($7\mu\text{m}$) のレーザにおいて、低しきい電流密度 ($3.3\text{ kA}/\text{cm}^2$)、横モード単一で電流増加に対しても安定（図－8）、広帯域変調 ($\sim 3\text{ GHz}$)、等の発振特性の改善を確認した。高温加速寿命試験では $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザと同等以上の信頼度を確認した。また、単一モード・ファイバを使用した 800 Mb/s 、 38 km の高速・長距離の伝送実験に成功し、本レーザの性能を立証した。



図－６ 反導波層によるレーザの構造



図－７ 屈折率差と活性層厚の関係

第6章は結論である。本論文では、光通信用半導体レーザを対象にして狭いストライプ幅での効率の良い電流閉じ込め構造を実現することにより、発振特性の改善およびその信頼性を確認した。具体的には、 $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザでは硫黄拡散により、 $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザでは反導波層を導入することにより、電流閉じ込め構造を実現した。これらのレーザ構造の製作方法と

動作機構は光通信用デバイスだけではなく、情報処理用の可視光帯レーザや高速信号処理用デバイスへの応用も可能なものである。すなわち、前者の硫黄拡散技術は GaAs、GaAlAs およびそのヘテロ接合層を使用した可視光帯レーザ、LED や HEMT、HBT 等の高速デバイスへも応用でき、後者の電流閉じ込めと横モード制御の機構はレーザ全般に適用でき、特に横モード制御が重要な情報処理用の可視光帯レーザに対しては有用であると考えられる。

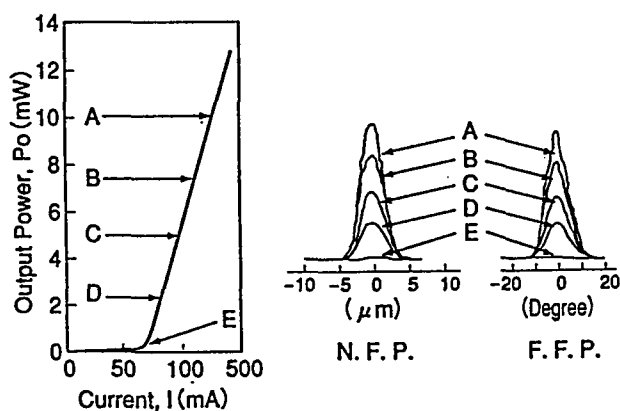


図-8 注入電流に対する近・遠視野像特性

審査結果の要旨

高速・大容量の光通信用半導体レーザには、発振特性の高性能・高信頼性が要求されており、これを実現するためには結晶成長層の品質向上、およびデバイスの構造最適化とプロセス技術の確立が必要である。著者は、発振波長が $0.85\mu\text{m}$ 帯の GaAlAs/GaAs と $1.3\mu\text{m}$ 帯の InGaAsP/InP DH レーザを対象に、レーザ発振に寄与しない広がり電流成分を減少させる効率の良い電流閉じ込め構造の検討を行った。具体的には、 $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザでは n 型不純物である硫黄の選択拡散を初めてデバイスに適用し、また $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザでは n 型 InGaAsP 層を p 型 InP 層に導入して、電流閉じ込め構造を実現した。本論文はこれらの研究成果をまとめたもので、全文 6 章より成る。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、狭いストライプ幅での電流閉じ込めが光通信用半導体レーザの動作に重要であり、発振特性が改善出来ることを述べている。

第 3 章では、 $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザを対象にした硫黄拡散について述べ、実験結果と理論解析の良好な一致が得られたことを示している。GaAlAs およびヘテロ接合層への硫黄拡散を初めて行い、拡散係数等の物質定数を系統的な測定より決定している。亜鉛拡散のような高濃度拡散ではなく、 10^{16}cm^{-3} オーダの低濃度拡散が実現できることが特長であり、さらに拡散によるダメージも非常に少ないことを明かにした。これらは重要な知見である。この結果をもとにした硫黄拡散によるレーザを製作し、その発振特性の実験的・理論的検討について述べ、レーザ特性の改善を確認している。

第 4 章では、 $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザを製作し、その特性の特徴と問題点について $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザと比較して述べている。発振特性には大きな差はないが、 $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザが端面劣化に対して強いこと、およびしきい値電流の温度特性が劣ることを指摘している。

第 5 章では、 $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザの p 型クラッド層内に n 型 InGaAsP 層を埋め込むことにより、電流閉じ込めを行う構造について述べている。この層によって、横モード制御に必要な 10^{-3} 以上の屈折率差が得られることを理論的・実験的に確認している。加速寿命試験では $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザと同等の信頼度を確認しており、単一モード・ファイバを使用した 800Mb/s , 38km の長距離伝送実験に成功し、本レーザの実用的な性能を立証している。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、光通信用半導体レーザにおいて、電流閉じ込め構造の改善が重要であることを明らかにし、 $0.85\mu\text{m}$ 帯レーザでは硫黄拡散によって、 $1.3\mu\text{m}$ 帯レーザでは n 型 InGaAsP 層によってその発振特性の高性能・高信頼性を図ったものであり、光エレクトロニクスおよび化合物半導体のプロセス技術の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。